

포화 사질토에서 전방 차수층이 실드터널 초과 이수압에 미치는 영향

이용준¹, 이상덕²

Effect of a frontal impermeable layer on the excess slurry pressure during the shield tunnelling in the saturated sand

Lee-Yong Jun, Lee-Sang Duk

ABSTRACT Slurry type shield would be very effective for the tunnelling in a sandy ground, when the slurry pressure would be properly adjusted. Low slurry pressure could cause a tunnel face failure or a ground settlement in front of the tunnel face. Thus, the stability of tunnel face could be maintained by applying an excess slurry pressure that is larger than the active earth pressure. However, the slurry pressure should increase properly because an excessively high slurry pressure could cause the slurry flow out or the passive failure of the frontal ground. It is possible to apply the high slurry pressure without passive failure if a horizontal impermeable layer is located in the ground in front of the tunnel face, but its location, size, and effects are not clearly known yet. In this research, two-dimensional model tests were carried out in order to find out the effect of a horizontal impermeable layer for the slurry shield tunnelling in a saturated sandy ground. In tests slurry pressure was increased until the slurry flowed out of the ground surface or the ground fails. Location and dimension of the impermeable layer were varied.

As results, the maximum and the excess slurry pressure in sandy ground were linearly proportional to the cover depth. Larger slurry pressure could be applied to increase the stability of the tunnel face when the impermeable layer was located in the ground above the crown in front of the tunnel face. The most effective length of the impermeable grouting layer was 1.0~1.5D, and the location was 1.0D above the crown level. The safety factor could be suggested as the ratio of the maximum slurry pressure to the active earth pressure at the tunnel face. It could also be suggested that the slurry pressure in the magnitude of 3.5~4.0 times larger than the active earth pressure at the initial tunnel face could be applied if the impermeable layer was constructed at the optimal location.

Keywords: Slurry type shield, Initial tunnel face pressure, Maximum slurry pressure, Excess slurry pressure

접수일(2011.7.7), 수정일(2011.7.18), 게재확정일(2011.7.25)

¹정회원, 단우기술단 부장, 공학박사

²정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

*교신저자: 이용준 (E-mail: geoeng9@empal.com)

요약 이수가압식 쉴드공법은 이수압을 적정 수준으로 관리하면 특히 사질토에서 적용성이 우수하지만, 이수압이 낮으면 이수 유출 및 지반변형이 발생하기도 한다. 따라서 이수가압식 쉴드공법에서는 초기 막장압보다 큰 초과 이수압을 가하여 막장의 안정을 유지한다. 그러나 이수압이 너무 높으면 전방 지반의 수동 파괴를 유발하므로 전방 지반의 수동 파괴 위험성을 배제하고 이수압을 증가시키는 방법으로 막장 전방에 수평 차수층을 설치하는 방안이 있으나 그 위치와 규모 및 효과가 잘 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 포화된 사질토에서 막장 전방에 차수 그라우팅을 적용할 경우에 발생하는 효과를 규명하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 실험에서는 차수층의 위치와 길이를 변화시키면서 이수의 유출이나 지반 파괴 이전까지 이수압을 가하여 최대 이수압과 지반 변위 및 이수의 유출로 인한 파괴 형상을 측정하여 분석하였다. 실험 결과, 전방 차수층이 없는 경우에 최대 이수압과 초과 이수압은 토피고에 선형비례 하였으며, 차수층이 존재하는 경우에는 차수층이 없는 경우보다 이수압을 크게 가할 수 있어서 전방 차수층이 막장 안정성을 증대시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 막장 안정성 증대에 가장 큰 영향을 주는 적정 차수층의 규격은 길이 1.0~1.5D, 설치높이 1.0D로 나타났다. 초기 막장압 대비 최대 이수압의 비로 막장의 자립 안전율(F)을 제안할 수 있으며, 전방 차수층을 적정 위치에 설치할 경우 초기 막장압보다 3.5~4.0배 크게 이수압을 가할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어: 이수가압식 쉴드, 초기 막장압, 최대 이수압, 초과 이수압

1. 서론

쉴드공법은 지반조건이 열악한 얇은 심도의 터널에 적용성이 우수한 공법으로 인식되고 있으나, 장비 선정과 지반조건에 대한 부적절한 대응 등의 문제로 시공 중에 사고나 트러블 사례가 발생하고 있다. 사질토에서 적용성이 뛰어난 이수가압식 쉴드를 이용하여 저토포 터널 굴진 시, 이수압에 의해 막장면에 형성된 불투수성의 이막(filter cake)으로 막장면의 토압 및 수압에 대항하고 안정을 이루게 되지만 이수압을 적절히 조절하지 못하면 지표침하, 막장면 붕괴, 이수의 지반침투나 할렬 파괴 등이 발생하여 막장면의 안정성이 저해될 수 있다.

이수가압식 쉴드 전방에 인위적으로 차수층을 형성하면 지반 내 지하수 흐름을 방해하여 막장압을 초과하도록 추가 가압이 가능하며, 이를 통하여 막장면 안정성 증대와 굴진속도의 향상을 도모할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이수가압식 쉴드터널 전방에 인위적으로 형성한 차수층의 위치와 크기에 따라 추가적으로 가할 수 있는 이수압의 크기를 실험을 통하여 측정하고 차수층이 없는 경우의 최대 이수압과 비교·분석하여 적정 차수층의 범위와 추가 이수가압의 한계값을 제안하고자 하였다.

2. 이론적 배경

전면밀폐형 쉘드공법에서는 쉘드와 라이닝을 이용해서 방사형 지보와 차수가 가능하지만 막장에서는 기계적으로 직접 지보할 수 없기 때문에 간접적인 방법을 사용한다. 이수가압식 쉘드공법에서는 이수(슬러리)를 가압하여 막장의 평형이 유지시킨다. 허용 지지압력은 지반의 특성, 지하수 조건, 터널의 크기와 토피에 따라 달라지며 막장면의 안정을 위한 최대 및 최소의 허용 지지압력을 구하려는 다양한 막장면 파괴 모델들이 제안된 바 있다. 대표적인 것으로 막장면 주변지반의 부분적 또는 전체적인 파괴를 설명하는 외적안정모델(external stability model)이 있다(DUP Science, 2001).

Anagnostou & Kovari(1996)는 막장면 이막에 대하여 Membrane Model을 제안하면서 Filter cake라 칭하였다. Filter cake는 주변지반으로 이수침투를 방지하는 역할을 하며, 초과 이수 압력(excess slurry pressure, Δp)과 흙의 임계투수계수(critical limit of permeability)가 확보되어야 형성된다고 주장하였다. 또한 이수가압식 쉘드에서 막장면 안정화 압력을 산정하는 외적안정 해석모델을 제안하였다. 막장면 압력(p_b)이 막장면 외부의 수압(p_w)을 초과하여야 막장면의 안정성이 확보되며($\Delta p > 0$), 막장면 안정에 필요한 초과 이수압 Δp 는 막장면 배후지반으로의 이수 침투 정도에 의해 좌우된다.

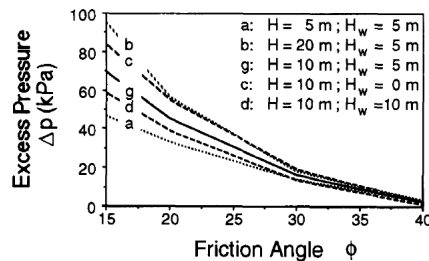


그림 1. 막장면 안정을 위한 최소 초과 이수압 Δp (Kovari, 1994)

표 1. 일본 이수가압식 쉘드에서의 막장 지지를 위한 이수가압 사례 (Kanayasu, 1995)

D(m)	Soil type	Support pressure used
7.04	cohesive soil	earth pressure at rest
6.63	gravel	water pressure + 10~20 kPa
7.45	sandy soil	loose earth pressure + water pressure + fluctuating pressure
6.84	soft cohesive soil, diluvial sandy soil	active earth pressure + water pressure + fluctuating pressure(≈20 kPa)
10.58	sandy soil, cohesive soil	active earth pressure + water pressure + fluctuating pressure(20 kPa)
7.25	sandy soil, gravel, soft cohesive soil	water pressure + 30 kPa
7.45	sandy soil, cohesive soil, gravel	water pressure + 30 kPa
10.0	sandy soil, cohesive soil, gravel	water pressure + 40~80 kPa

Kanayasu(1995)는 일본에서 적용된 이수가압식 실드공법의 막장지지를 위한 이수가압을 조사하고 이를 종합하여 표 1을 제시하였다.

막장안정을 위한 이수가압은 막장면 초기압력과 추가된 초과 이수압(excess slurry pressure, Δp)으로 구성된다. 사례조사에서 지보압은 수압을 기본으로 결정되었으며, 압력과 일반적인 굴착기간 동안 발생하는 압력변화를 고려하기 위하여 초과 이수압을 적용하였다.

사례조사결과에서 이수압은 터널의 직경과 관계없이 지반 조건에 따라 20 kPa을 적용한 것을 확인할 수 있다. 여기서 지반조건은 투수계수와 연관되며 막장 지지압은 초기 막장압과 추가 압력으로 구성된다. 경험적 방법에서 일반적으로 적용하는 최소 지보압력은 식 (1)과 같다(COB Commissie, 1996).

$$S_{\min} = K_a \sigma'_v + p + \Delta p(20 \text{ kPa}) \quad (1)$$

3. 모형실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 우선 차수층이 없는 포화 사질토에서 토피고에 따른 초기 막장압 실험을 실시하여 차수층을 포함하는 이수가압실험의 비교군으로 사용였다. 길이 1.2 m, 높이 1.2 m, 폭 0.5 m 크기의 2차원 모형 실험기에서 0.5D(D = 30 cm)씩 토피고를 증가시키고 상재하중을 가하면서 초기 막장압을 측정하였다(표 2, 그림 2).

또한, 포화 사질토에서 토피고에 따른 최대 이수압을 측정하기 위하여 2차원 이수가압 모형실험을 실시하였다(표 3).

끝으로 차수층을 점토질 Seam층으로 모사하고 초과 이수압 범위와 지표의 거동을 확인하고자 위에서 설명한 2차원 이수가압 모형 실험과 동일한 장치에서 토피고, Seam층의 위치와 크기에 따른 이수 가압실험을 실시하였다(표 4, 5, 그림 3, 4).

표 2. 초기 막장압 측정실험

실험명	토피고(D = 30 cm)	비고
TD05	0.5D	4단계 하중조건으로 단계별 재하 (140 kgf, 260 kgf, 380 kgf, 500 kgf)
TD10	1.0D	
TD15	1.5D	
TD20	2.0D	

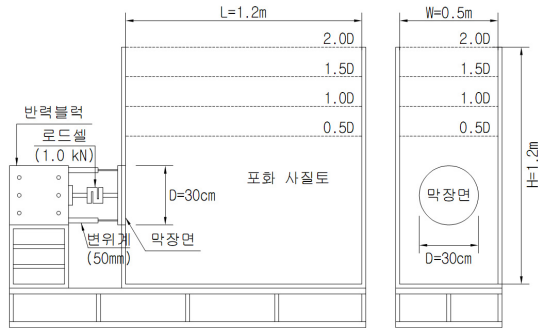


그림 2. 초기 막장압 측정 실험기

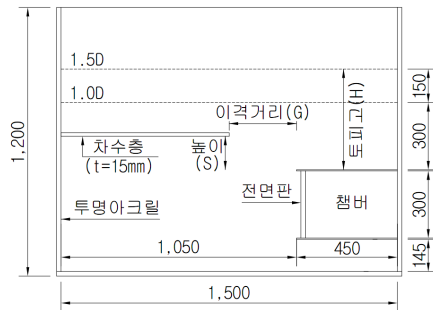


그림 3. 이수가압 실험(막장면과 차수층 이격거리)

표 3. 이수가압 실험(차수층 없음)

지반조건	토피고(H)	실험명
사질토(SP)	0.5D	H05S00L00
	1.0D	H10S00L00
	1.5D	H15S00L00
	2.0D	H20S00L00

표 4. 이수가압 실험(막장면과 차수층 이격거리)

지반조건	토피고(H)	Seam층		실험명
		높이(S)	이격거리(G)	
사질토(SP)	1.5D	0.5D	-1.5D	H15S05G-1.5
		0.5D	-1.0D	H15S05G-1.0
		0.5D	-0.5D	H15S05G-0.5
		0.5D	0D	H15S05G00
		0.5D	+0.5D	H15S05G+0.5
		0.5D	+1.0D	H15S05G+1.0
		0.5D	+1.5D	H15S05G+1.5

표 5. 이수가압 실험(차수층의 위치, 크기 변화)

지반조건	토피고(H)	Seam층		실험명
		높이(S)	길이(L)	
사질토(SP)	1.0D	0.5D	0.5D	H10S05L05
		0.5D	1.0D	H10S05L10
		0.5D	1.5D	H10S05L15
		0.5D	2.0D	H10S05L20
	1.5D	0.5D	0.5D	H15S05L05
		0.5D	1.0D	H15S05L10
		0.5D	1.5D	H15S05L15
		0.5D	2.0D	H15S05L20
		1.0D	0.5D	H15S10L05
		1.0D	1.0D	H15S10L10
		1.0D	1.5D	H15S10L15
		1.0D	2.0D	H15S10L20
	2.0D	0.5D	0.5D	H20S05L05
		0.5D	1.0D	H20S05L10
		0.5D	1.5D	H20S05L15
		0.5D	2.0D	H20S05L20
		1.0D	0.5D	H20S10L05
		1.0D	1.0D	H20S10L10
		1.0D	1.5D	H20S10L15
		1.0D	2.0D	H20S10L20
		1.5D	0.5D	H20S15L05
		1.5D	1.0D	H20S15L10
		1.5D	1.5D	H20S15L15
		1.5D	2.0D	H20S15L20

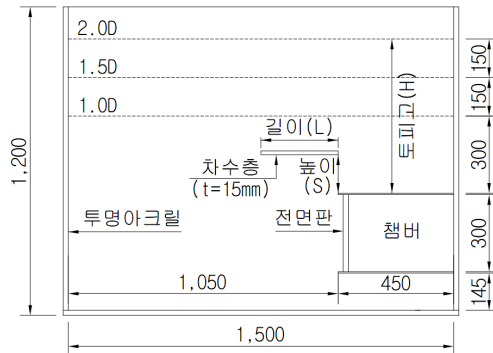


그림 4. 이수가압 실험(차수층의 위치, 크기 변화)

www.kci.go.kr

3.2 모형 실험기

막장에 작용하는 초기 압력은 길이 1.2 m, 높이 1.2 m, 폭 0.5 m 크기로 모형실험기를 제작하여 실험하였다. 전면에 위치한 반력벽에 로드셀을 설치하여 막장면의 토압을 측정하였으며, 터널 전면 판에 변위계를 설치하여 지반 조성 중 편심 발생 여부를 확인하였다. 토조는 강성이 충분히 큰 투명 아크릴 벽체($t = 20 \text{ mm}$)를 사용하였으며 무마찰 조건이 되게 하였다. 초기 막장압 측정 실험기의 개요도는 그림 2와 같다. 또한 상재하중에 의한 막장압 증가 영향을 확인하기 위하여 4단계 상재하중을 가하였다. 하중재하는 지표면에 재하판을 설치하고 상부에 재하판을 포함한 작용 하중이 140, 260, 380, 500 kgf가 되도록 블록을 추가하여 막장압이 안정된 이후의 값을 측정하였다.

이수가압 모형 실험기는 길이 1.5 m, 높이 1.2 m, 폭 0.3 m의 규격으로, 쉴드 챔버 내에 이수가압 시 막장면과 주변지반의 거동을 측정할 수 있는 2차원 실험장치이다(그림 5). 외측은 투명 아크릴 벽체($t = 20 \text{ mm}$)로, 무마찰 조건으로 제작하였으며, 이수가압 시 지반 거동 및 이수의 침투 및 지표 변형 등을 관찰할 수 있다. 모형 실험기 외부는 변형을 방지하기 위하여 강성 평철로 구속하였다. 터널의 전면판은 높이 30 cm, 폭 30 cm, 두께 2 cm의 아크릴 다공판으로 제작하였으며, 초기에 챔버 내부를 이수로 채우는 과정에서 유로를 확보하고 챔버 내로 사질토 입자가 유입되지 않도록 철망(#100)을 부착하였다. 전면판은 챔버 내부가 이수로 교환된 이후 챔버 내측으로 이동이 가능하여 막장면이 이수만으로 유지되도록 하였다. 가압 시 쉴드 내부 이수압은 외부 이수 탱크와 연결된 주입선에 간극수압계를 설치하여 측정하였다(그림 6).

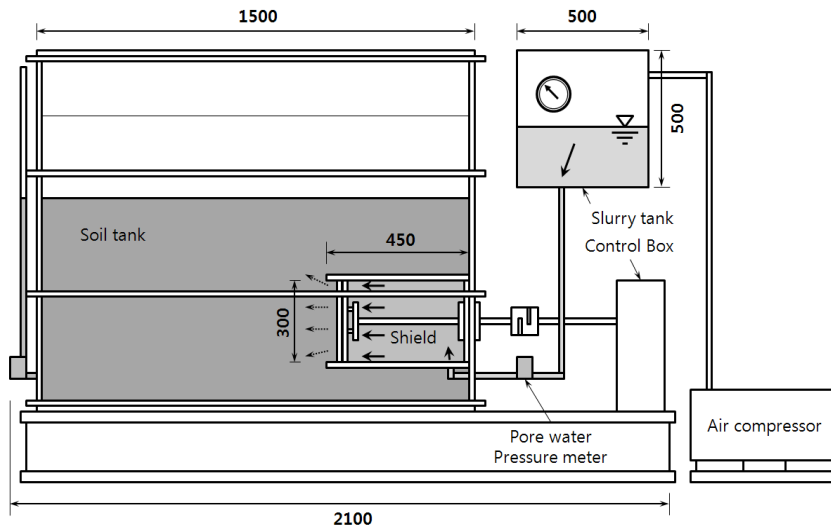


그림 5. 이수가압 실험기 개요도

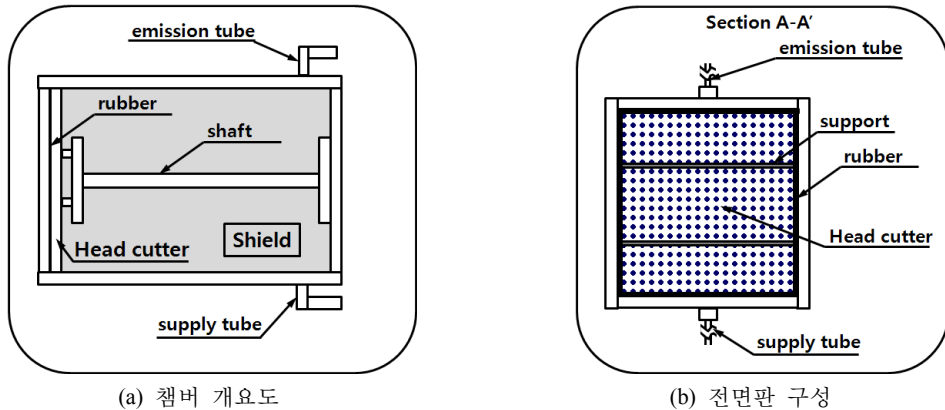


그림 6. 이수가압 실험기 챔버 개요도

3.3 실험 지반

실험에 사용한 사질토는 입도분포시험(KS F 2301), 최대·최소 건조단위중량시험(DIN 18126), 비중시험(KS F 2308) 등, 기본물성 시험을 통하여 특성을 확인하였다. 또한 역학적 특성조사를 위하여 직접전단시험(KS F 2343)을 실시하였다. 투수계수는 Hazen(1892) 공식을 적용하여 산정하였다(식 2).

$$k \approx 100D_{10}^2 \quad (2)$$

여기서 k : 투수계수(cm/sec), D_{10} : 유효입경(cm)

실험에 차수층으로 사용한 점토의 물성은 입도분포시험(KS F 2301, 2302), 액소성 한계시험(KS F 2303, 2304)을 실시하여 측정하였다. 통일 분류법에 의해 CL(중소성의 점토)에 해당한다. 점토질 Seam층의 투수계수는 Hazen(1892)의 공식을 균등계수를 이용하여 보정해서 구하였다(식 3).

표 6. 사질토의 지반특성

입도분포	비중(G_s)	γ_{dmax}	γ_{dmin}	γ_d
D10 = 0.08 mm Cu = 3.75 Cc = 2.64	2.65	16.4 kN/m ³	12.6 kN/m ³	15.9 kN/m ³
내부마찰각(ϕ)	상대밀도(D_r)	간극비(e)	투수계수(k)	
37°	88.5%	50.4%	1.76×10 ⁻¹ cm/sec	

표 7. 차수층의 지반특성

입도분포	액성한계(w_L)	소성한계(w_P)	투수계수(k)
D10 = 0.0073mm Cu = 10.0 Cc = 0.75	42.5%	15.8%	5.33×10^{-6} cm/sec

표 8. 벤토나이트의 특성

수분(%)	≤ 12
팽윤도(ml/g)	≥ 10
겉보기 비중	0.75 ~ 0.85
pH	≤ 11
입도(#200 잔류량)(%)	≤ 20

$$k \simeq \frac{100D_{10}^2}{C_u} \quad (3)$$

여기서, k : 투수계수(cm/sec), D_{10} : 유효입경(cm), C_u : 균등계수

실험에 사용한 이수는 실제 쉘드공법에서 적용되는 벤토나이트를 농도 5%로 증류수와 혼합하여 24시간의 안정화시킨 뒤에 사용하였다.

3.4 실험 순서

심도별 초기 막장압은 전면판에 로드셀과 변위계를 설치한 후 사질토를 수중에서 강사하여 계획 토피고까지 조성한 후에 전면판에 작용하는 하중을 측정하여 구하였다. 초기 막장압을 측정한 후에 상재하중에 영향을 확인하기 위하여 4단계로 하중을 재하하였다(그림 7).

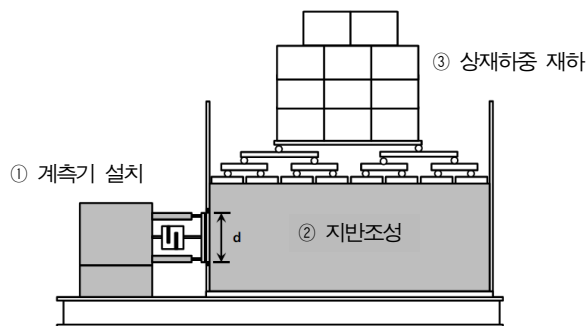


그림 7. 초기 막장압 측정실험 순서

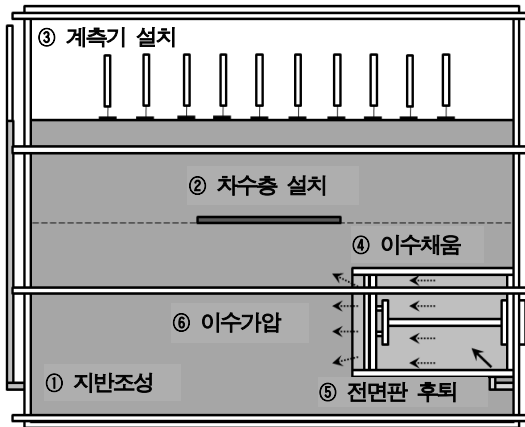


그림 8. 이수가압실험 순서

이수가압실험의 진행순서는 다음과 같다.

- ① 사질지반을 물다짐 방식으로 조성하면서 소정 위치에 차수층을 설치한다.
- ② 챔버에 이수를 주입한다. 이때 내부의 물을 외부로 유도하는 유출관으로 이수가 유출되면 이수 교환이 완료된 것으로 판정한다.
- ③ 전면판에서 부담하던 토압과 수압을 이수가 부담하도록 전면판과 원지반이 비접촉상태가 되도록 전면판을 30 mm 후퇴한다.
- ④ 계측기를 설치하고 이수 주입관에 연결된 간극수압계를 초기화한 후 이수압을 가한다. 챔버 내에 한 번에 큰 압력을 가할 경우 지반 내 침투가 충분히 이루어지지 않고 전면지반에 압력으로 작용할 수 있으므로 0.1 kPa/sec의 속도로 이수압을 증가시켰다.
- ⑤ 시간대별 이수압의 증가와 지표변위를 계측하고 동일 계측시점에서 연속적으로 사진을 촬영하여 이수의 확산과 Seam층의 변형을 기록한다.

4. 실험결과

4.1 초기 막장압 측정 실험

실험 결과, 토피고의 증가에 따라 초기 막장압은 선형적으로 비례하여 증가하며 상재하중을 추가한 경우에도 같은 결과를 보여준다(표 9, 그림 9). 따라서 토피고와 상재하중은 초기 막장압에 직접적으로 영향을 주는 것을 확인하였다.

표 9. 토피고별 초기 막장압(kPa)

토피고(C/D)	상재하중(kgf)				
	0	140	260	380	500
0.5	4.5	5.1	5.7	6.5	6.8
1.0	6.7	7.2	8.0	8.4	9.0
1.5	8.8	9.3	10.1	10.6	11.2
2.0	10.9	11.6	12.1	12.7	13.5

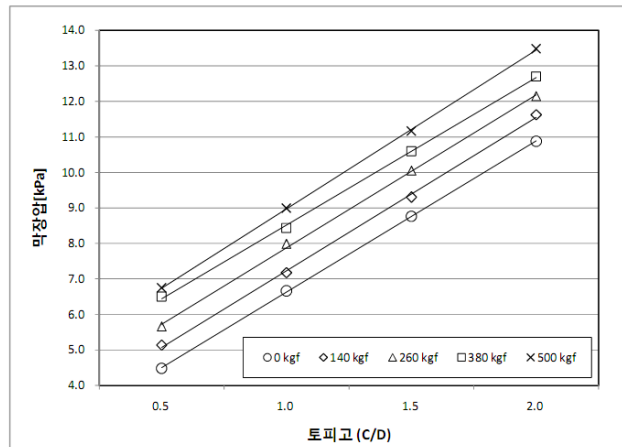


그림 9. 토피고별 초기 막장압(kPa)

막장면이 안정을 이루기 위한 최소 조건은 막장면에서 힘이 평형을 이루는 상태로 터널 내측에 작용하는 압력과 동일한 압력을 외측에 주어야한다. 본 실험에서와 같이 포화된 균질한 사질토에서 수평하중은 수평토압과 정수압 상태의 수압으로 산정할 수 있다. 실험 결과 확인을 위하여 실험에서 측정된 초기 막장압과 주동토압계수를 적용한 이론 초기 막장압을 비교하였다. 이론 막장압은 측정값과 비교를 위해 전면판의 도심에 작용하는 토압에 면적을 곱하여, 전면판에 가해지는 막장면 압력을 산정하였다. 초기 막장압 산정식은 다음과 같고 개요도는 그림 10과 같다.

$$P = \gamma_{sat} hKA + qKA + \gamma_w hA \tag{4}$$

γ_{sat} : 포화 단위중량, γ_w : 물의 단위중량, h : 토피고, q : 상재하중, K : 수평토압계수, A : 전면판의 단면적

측정한 초기 막장압과 이론식으로 산정한 초기 막장압은 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 이러

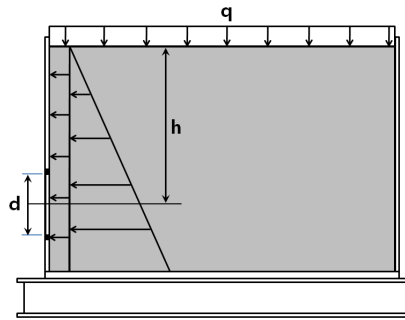


그림 10. 원형 전면판에 작용하는 막장압

한 결과는 실험 조건이 균질한 사질토에서 완전 포화된 상태로 일관성 있는 실험이 진행되었음을 보여준다. 또한 굴착 전 단계에서는 주동상태임을 확인할 수 있다. 이론 막장압과 실험 결과 비교는 표 10, 그림 11과 같다.

전방 차수층을 포함하는 포화된 사질토에서의 이수기압 실험에서 초기 막장압은 초기 막장압 측정실험의 결과를 바탕으로 주동상태를 고려한 이론식 값을 반영하였다.

표 10. 초기 막장압의 비교(실험 / 이론식, kPa)

토피고 (C/D)	상 재 하 중(kgf)				
	0	140	260	380	500
0.5	4.5/4.5	5.1/5.1	5.7/5.6	6.5/6.1	6.8/6.6
1.0	6.7/6.8	7.2/7.3	8.0/7.8	8.4/8.3	9.0/8.8
1.5	8.8/9.0	9.3/9.6	10.1/10.1	10.6/10.6	11.2/11.1
2.0	10.9/11.3	11.6/11.8	12.1/12.3	12.7/12.8	13.5/13.3

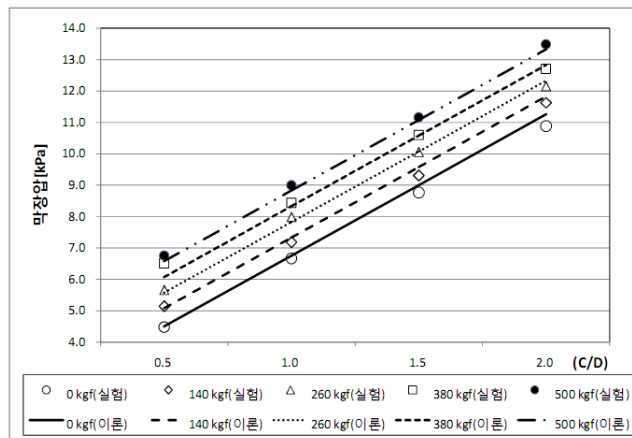


그림 11. 초기 막장압 비교(실험 vs. 이론)

4.2 이수가압 실험

(1) 실험 구분

전방 차수층을 포함하는 포화 사질토에서의 쉘드터널 초과 이수압 범위를 확인하기 위하여 실험을 두 종류로 구분하였다. 먼저 포화된 사질토만으로 구성된 이수가압 모형실험은 토피고를 변수로 진행하였다. 실험의 결과는 점토질 차수층을 포함하는 지반에서의 이수가압 실험 결과와 비교하여 전방 차수층 유무에 따른 영향을 확인하는 데에 활용된다.

두 번째로 차수층을 포함하는 지반에서 토피고와 차수층의 위치, 크기를 변화시키면서 이수가압 실험을 실시하였다. 각 조건별로 이수압의 증감을 확인하고 최대 이수압을 선정하였다.

(2) 최대 이수압 선정 조건

임의 조건에서 최대 이수압은 이수의 유출 없이 막장면이 안정적으로 유지되는 상태에서 도달할 수 있는 이수압의 최대값을 의미하며, 최대 이수압과 초기 막장압의 차이는 해당 조건에서의 최대 초과 이수압이다. 따라서 다음 두 가지 조건중 하나를 만족할 경우, 최대 이수압으로 규정하였다.

- 시간에 따른 이수압 그래프에서 이수압이 증가하여 Peak에 도달한 후 감소하거나, 일정 시간 동안 유지되다가 증가 또는 감소하는 경우.
- Peak점이 불명확하거나 여러 지점에서 확인될 경우에는 실험 중 동일 시간에 연속적으로 촬영한 사진을 분석하여 막장면 터널 천단부에 이수가 유출되는 현상이 발생한 시간대의 이수압.

(3) 지표변위 검토

각 Case별 최대 이수압 상태에서 지표변위를 막장면을 중심으로 위치별로 측정하여 검토하였다. 최대값 발생 이후(peak점 통과 후)는 이수의 챔버 외부 유출이나 막장면의 파괴로 판단할 수 있으므로 최대 이수압 발생 이후의 변위는 정량적으로 의미가 없다. 따라서 지표변위는 최대 이수압 도달 시기를 기준으로하여 분석하였으며, 최대 이수압 도달 이후의 지반 변형형태는 사진을 통하여 변형 발생 경향 중심으로 분석을 수행하였다.

(4) 초기 막장압 측정실험의 활용

챔버 내에서 이수압은 막장이 힘의 평형을 유지하는 초기 막장압을 기준으로 증가분에 대하여 계측한다. 따라서 각 조건에서 초기 막장압의 산정이 매우 중요하며 이를 위하여 초기 막장압 측정 결과를 바탕으로 산정한 이론 초기 막장압을 기준으로 이수가압 실험에서 측정한 이수압 증가분을 합하여 최종 이수압으로 하였다. 이수가압 실험에서의 초기 막장압은 표 11과 같다.

표 11. 이수가압 실험에서의 초기 막장압(kPa)

구 분	토피고(C/D)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
초기 막장압	4.5	6.8	9.0	11.3

4.2.1 사질토 이수가압 실험

(1) 최대 이수압

각 Case에서 최대 이수압은 토피고에 선형비례하였다(그림 12). 이러한 결과는 막장면에서 가해지는 이수의 압력이 토피고에 의해 결정된다는 것을 보여준다. 또한 토피고가 상승할수록 최대 이수압과 초기 막장압의 차이(초과 이수압)도 증가하였다(표 12).

막장면 초기압력은 해당지점의 수압과 토압의 합으로, 이수가압 실험에서 측정된 최대 이수압과 초기 막장압의 차이는 Anagnostou & Kovari(1994)가 제안한 멤브레인 막장안정 모델에서 이수 침투로 발생하는 막장면 전면에 이막(Filter cake)을 형성하기 위한 침투압으로 설명할 수 있다. 또한 그 차이가 토피고(C/D)가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것은 토피고(C/D) 상승에 따라 막장전면의 사질토 내 간극수압이 증가하므로 이막(filter cake)을 형성하기 위한 소요 침투 압력도 증가한다는 사실로 설명된다.

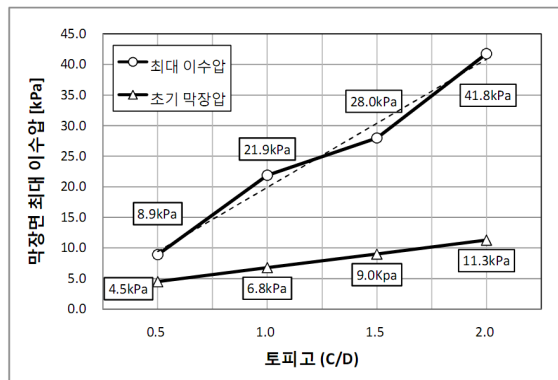


그림 12. 토피고별 최대 이수압(사질토)

표 12. 토피고별 초과 이수압(사질토, kPa)

구 분	토피고(C/D)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
초기 막장압	4.5	6.8	9.0	11.3
최대 이수압	8.9	21.9	28.0	41.8
초과 이수압	4.4	15.1	17.0	30.5

Anagnostou & Kovari(1994)는 자갈 또는 모래와 같이 내부마찰각(ϕ)이 30° 를 상회하는 범위에서, 평형한계 즉 막장자립 안전율이 1(safety factor $F = 1$)인 상태 유지를 위하여 초기 막장압에 추가로 가하는 초과 압력(excess pressure, Δp)은 20 kPa 이하로 충분하다고 주장하였다. 실제 이수가 압식 쉘드 적용사례에서는 막장면의 안정을 위하여 막장면에 작용하는 압력(초기 막장압 = 토압 + 수압)보다 10~30 kPa 정도 높은 압력을 챔버 내에 가하고 있다.

사질토만으로 구성된 이수가압 실험 결과에서 토피가 매우 낮은 0.5D(H05)를 제외한 3개 Case의 결과는 현장의 추가 이수가압 범위(10~30 kPa)에 속하고 있다. 따라서 토피가 매우 낮은 경우($C/D = 0.5$)에서는 일반적인 범위의 추가 이수압을 가하는 것에 신중해야 한다는 것을 알 수 있다.

(2) 지표변위

그림 14는 최대 이수압 도달시에 지표변위를 정리한 그래프이다. 토피고 0.5D를 제외하고 막장면 전면보다 후면 쪽으로 지반용기가 발생하였다. 토피고 0.5D(H05S00L00)에서 최대 이수압 발생 약 45초 이후에 터널 막장면 전면 0.1 m 위치의 지표로 이수가 유출되어 지반함몰이 발생하였으며 그림 13의 지표유출지점과 일치한다.



그림 13. 지표유출(H05S00L00)

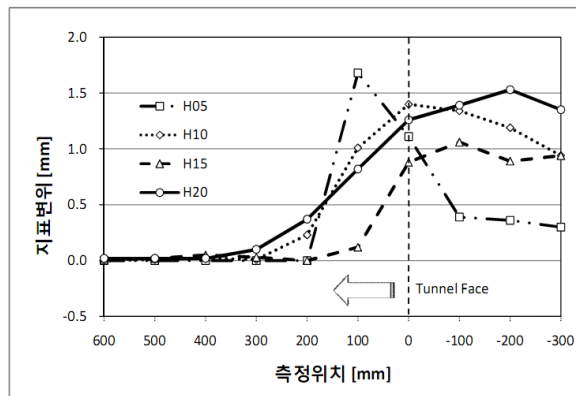


그림 14. 최대 이수압에서의 지표변위(사질토)

(3) 이수유출 형상

챔버 외부 지반으로의 이수유출 현상은 터널 천단에서 시작되었으며 토피고가 낮은 경우($C/D = 0.5$)에는 이수가 직상향 이동하여 지표로 유출되고 C/D 가 1.0 이상인 경우, 수평 확산되는 현상을 보였다.

챔버 내 이수의 최초 유출 위치와 지반 내에 확산경향은 각 조건에서의 막장면 작용압력과 이수 가압의 관계에서 설명할 수 있다. 심도별 초기 막장압을 토압과 수압으로 분리하고 해당 실험에서의 최대 이수압을 정리하여 도식화하면 그림 15와 같다.

최대 이수압은 막장 파괴 전 단계에서 발생하며 토압과 수압의 합으로 이루어진 초기 막장압과 지반 내 이수 침투압 및 지지압으로 분리할 수 있다. 심도별 모든 경우에서 터널 천단부 초기 막장압은 실험 최대 이수압보다 작은 상태에 놓이며, 동일 지반조건에서 터널 천단의 실험 최대 이수압과 초기 막장압의 차(잔여 이수압, Δp)는 2.0~2.3 kPa로 계산된다. 터널 천단에서 발생하는 Δp 로 인하여 지반 내 이수 유출은 천단부에서 발생하게 된다.

유출된 이수의 확산은 잔여 이수압(Δp)의 크기와 천단부 지반의 정수압과 연관되어 설명할 수 있다. 토피고가 낮은 C/D 가 0.5인 경우에서는 천단부 정수압(1.5 kPa)이 잔여 이수압($\Delta p = 2.2$ kPa)보다 작은 상태에 놓이게 되어 터널 직상부 지표로 이수의 유출이 발생한다. 그러나 토피고가 상대

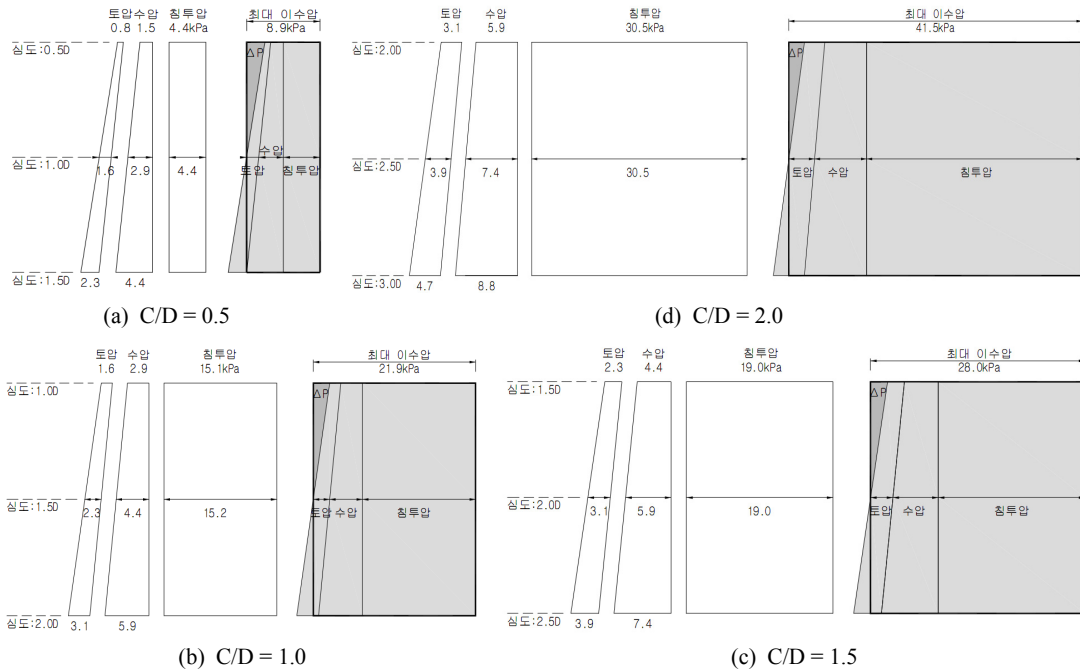


그림 15. 막장면에서의 심도별 압력 분포

적으로 높은(C/D 1.0 이상) 경우에는 잔여 이수압(Δp)이 천단부 정수압 보다 큰 상태에 놓이게 되어 상부로 유출되지 못하고 수평으로 범위를 확산시키는 현상이 발생한다. 이러한 이수의 유출현상은 전방 차수층을 포함하는 이수가압 실험에서도 동일하게 확인된다.

4.2.2 차수층을 포함하는 사질토 이수가압 실험

(1) 최대 이수압

차수층을 포함하는 경우에 대한 이수가압 실험에서 최대 이수압은 차수층이 없는 동일 토피고에서의 최대 이수압보다 모두 크게 측정되어 차수층으로 인한 이수압 증가 효과를 확인할 수 있었다(그림 16). 이것은 이수 침투로 발생한 지반 내 물의 흐름이 전방 차수층에 의해 방해받고 있다는

표 13. 차수층의 길이, 위치에 따른 최대 이수압(kPa)

구 분	차수층의 길이(L)				비교 최대 이수압		
	0.5D	1.0D	1.5D	2.0D			
H10S05	23.0		24.2		25.3	24.4	21.9
H15S05	32.5		33.1		34.2	32.2	28.0
H15S10	33.3		34.2		35.3	32.5	28.0
H20S05	42.7		45.2		43.8	43.0	41.8
H20S10	42.7		44.9		43.5	43.0	41.8
H20S15	44.1		45.2		43.2	43.0	41.8

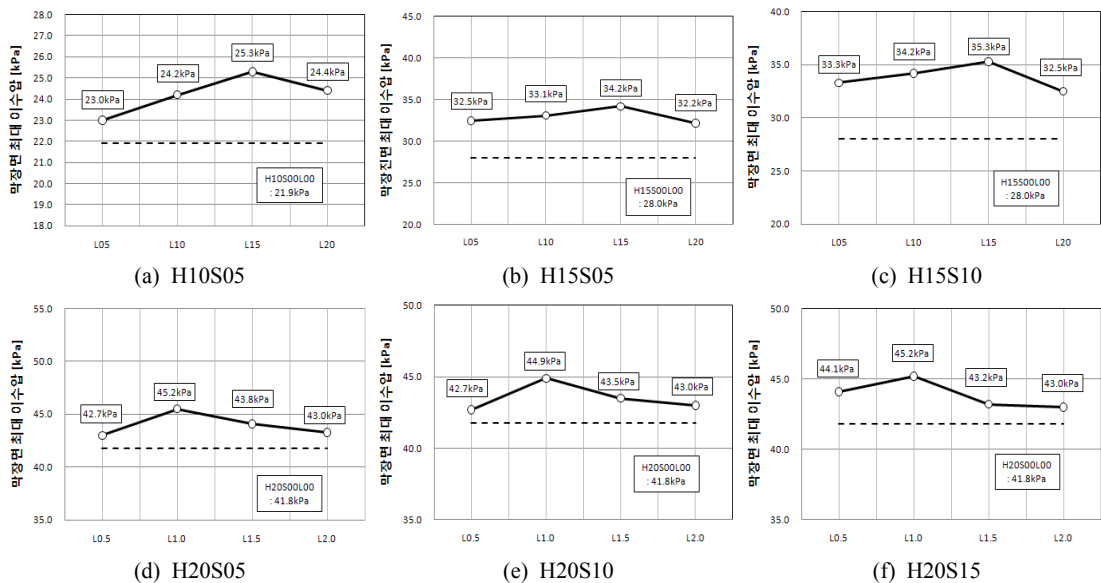


그림 16. 차수층의 길이, 위치에 따른 최대 이수압(kPa)

것을 의미한다. 각 이수가압 실험에서 측정된 최대 이수압을 정리하여 표 13에 수록하였다.

차수층을 포함하는 지반에서 최대 이수압과 동일 토피고의 사질토에서 측정된 최대 이수압을 비교하여 그림 17에 도시하였다. 최대 이수압 증가율은 ‘4.2.1’의 차수층이 없는 사질토에서 측정된 최대 이수압을 기준으로 차수층을 포함하는 동일 토피고의 최대 이수압이 얼마나 증가되었는지를 비율로 나타낸 것으로 차수층에 의한 최대 이수압 증가정도를 나타낸다. 모든 Case에서 차수층이 없는 경우보다 최대 이수압이 크게 발생하여 차수층에 의한 최대 이수압 증가 효과를 확인할 수 있다.

터널 천단 상부에 부분적으로 원지반 투수계수보다 매우 작은 투수계수를 가진 불투수층을 형성 하면 최대 이수압이 증가되며, 이를 활용할 경우 이수가압식 실드에서 추가로 가하는 이수압의 적용 범위를 확대할 수 있어 터널과 주변지반의 안정성을 증대시키고 시공성을 향상시킬 수 있다.

그림 17에서 최대 이수압 증가율을 토피고에 따라 2.0D(H20)와 1.5D(H15) 이하, 두 가지로 나누어 비교하였다. H10S05L05를 제외한 토피고가 1.5D 이하인 11개 Case에서 최대 이수압 증가율이 11~26%로 크게 발생하였다. 이 결과는 토피고가 낮을 경우 막장 전면 지반의 간극수압도 낮기 때문에 차수층의 최대 이수압 증가 효과가 크게 발생하였기 때문이다. 따라서 낮은 토피고에서 터널 전방 상부를 부분적인 불투수층으로 개량 할 경우 추가 이수가압을 할 수 있다. 토피고 1.5D 이하인 경우에 차수층의 길이가 터널 막장면 전면으로 1.5D를 초과하면 최대 이수압 증가율이 감소하므로 토피고 1.5D 이하인 경우에는 1.5D 크기가 효과적이다.

토피고가 높을 경우(2.0D)는 보강을 통한 안정성 확보가 가능하지만 최대 이수압의 증가율이 차수층 크기에 따라 2~8% 정도로 되어 크지 않다.

그림 17의 결과로부터 토피고 및 차수층의 위치에 따른 최대 이수압 변동폭을 산정하여 그림

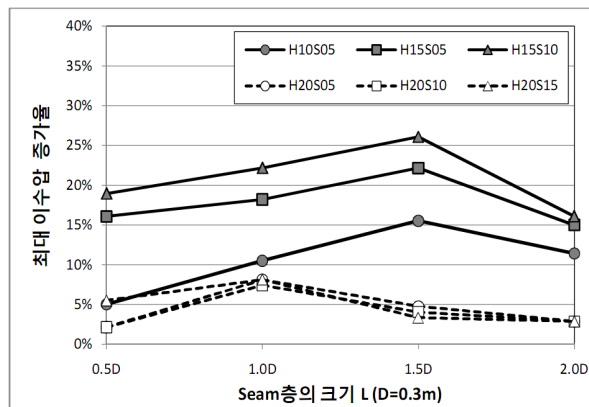


그림 17. 차수층 포함시 최대 이수압 증가율(사질토 기준)

18에 도시하였다.

토피고가 상대적으로 낮은 H10에서 11%로 변동 폭이 가장 크며 이 외의 조건에서는 큰 차이 없이 5~7%의 변동폭을 보이고 있다. 이러한 결과는 토피고가 낮을 경우 막장 전면 지반의 간극수 압도 작기 때문에 이막(filter cake) 형성시 발생하는 간극수압의 변동폭도 상대적으로 증가하여 작은 이수압의 변화에도 민감하게 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

초기 막장압과 평형을 이루는 이수압 조건에서의 안전율(F)은 1이며 따라서 각 토피고별 초기 막장압과 최대 이수압을 비교하면 차수층 적용에 따른 안전율을 산정할 수 있다. 차수층을 포함하는 사질토에서 이수압 실험결과, 차수층으로 인한 안전율은 모두 3.5~4.0 범위에서 증가하였다 (그림 19).

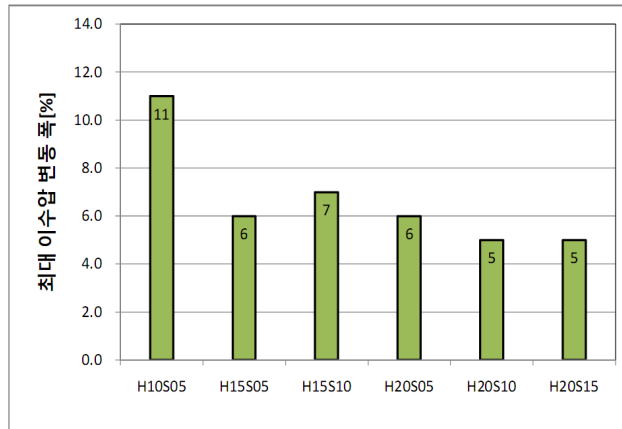


그림 18. 차수층 포함시 최대 이수압의 변동 폭

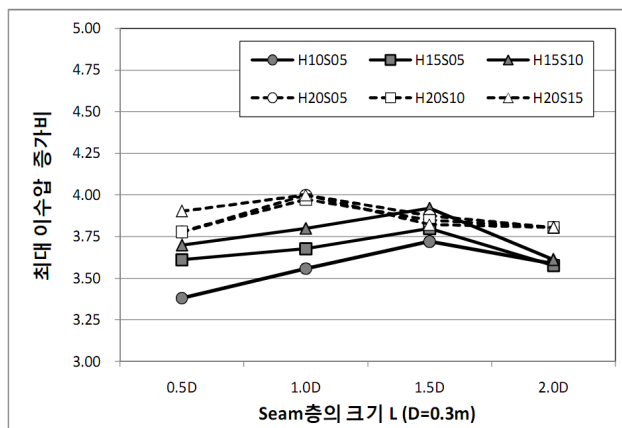


그림 19. 차수층 포함시 최대 이수압 증가비

$$\text{최대 이수압 증가비(안전율 } F) = \frac{\text{최대 이수압}}{\text{초기막장압}} \quad (5)$$

차수층의 높이, 길이에 따른 실험 결과 중에서 이수압 증가효과가 뚜렷한 토피고 1.5(H15)에 한하여 차수층이 막장면 방향으로 점진적으로 이격거리를 줄여오는 경우에 대한 실험을 추가로 실시하였다.

차수층이 터널 전면과 굴진방향으로 가장 크게 이격된 H15S05G-1.5에서 최대 이수압이 가장 작게 측정되었으며 터널과 1.0D 이격된 지점에서 슬드의 배면까지 범위에서 최대 이수압이 30% 이상으로 비교적 크게 측정되었다(그림 20).

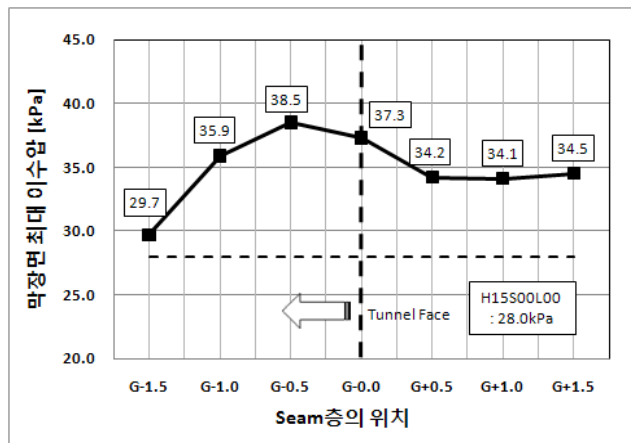


그림 20. 차수층의 이격거리에 따른 최대 이수압(kPa)

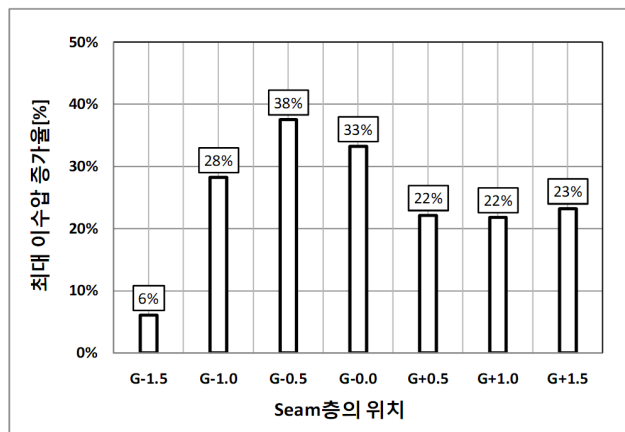


그림 21. 이격거리에 따른 최대 이수압 증가율(사질토 기준)

차수층을 포함하지 않는 경우와 비교한 최대 이수압의 증가율을 그림 21에 도시하였다. 최대 이수압 증가율은 1.5D 이격시 6%로 크게 증가하지 않아 차수층이 굴착방향으로 1.0D 이내 있는 경우가 효과적일 것으로 판단된다.

차수층의 이격거리에 따른 안전율 증가는 막장과 이격거리가 가장 먼 1.5D를 제외하고 3.5~4.0 범위에 모두 분포하고 있다(그림 22).

(2) 지표변위

지표변위는 토피고와 차수층의 크기, 위치, 막장과의 이격거리에 따라 큰 차이를 보이고 있지 않으며 대부분의 실험 Case에서 전반적으로 터널 막장면을 중심으로 후면 쪽에 치우친 결과를 보여 주고 있다(그림 23, 24, 25, 26)

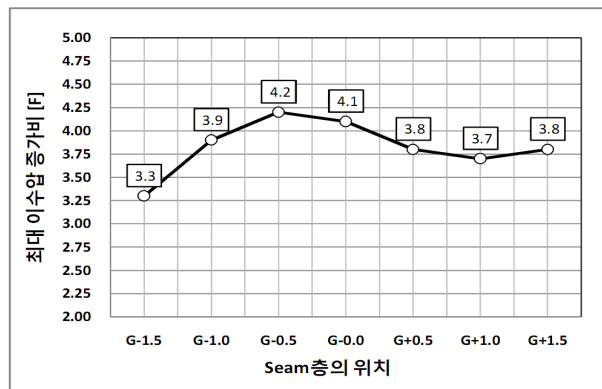


그림 22. 이격거리에 따른 최대 이수압 증가비

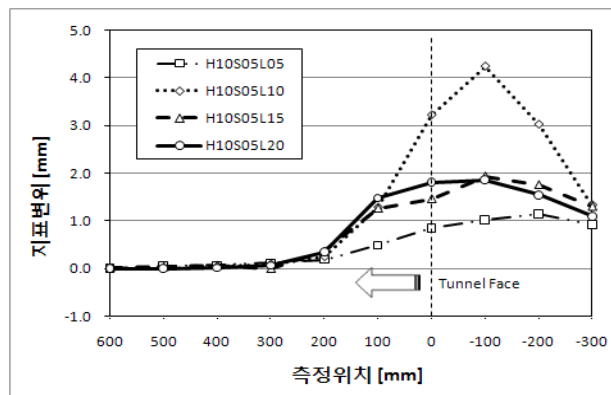


그림 23. 최대 이수압에서의 지표변위(H10S05)

www.kci.go.kr

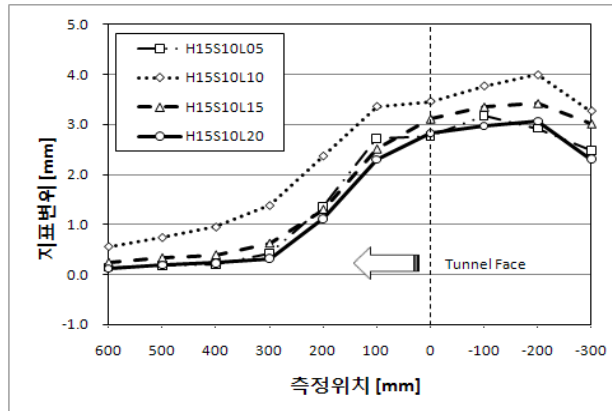


그림 24. 최대 이수압에서의 지표변위(H15S10)

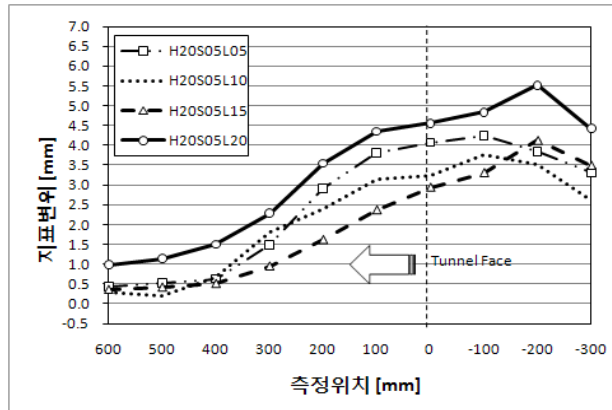


그림 25. 최대 이수압에서의 지표변위(H20S05)

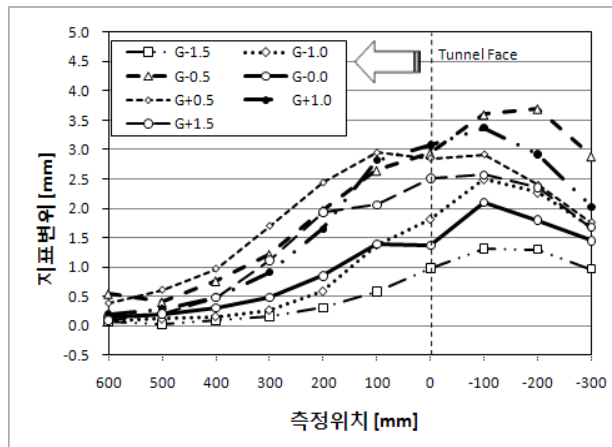


그림 26. 최대 이수압에서의 지표변위(H15S05G)

5. 결 론

포화 사질토에서 차수층의 위치와 크기에 따른 쉘드 터널의 추가 이수압 증가효과를 확인하기 위하여 모형실험을 실시하고 이를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 예비실험으로 진행된 초기 막장압 측정 실험에서 초기 막장압은 주동토압계수를 적용한 토압과 해당 위치의 정수압의 합으로 계산되는 이론식과 매우 유사하였으며, 이수가압 이전의 막장면 원지반은 주동상태임을 확인하였다.
2. 사질토만으로 구성된 지반에서 수행한 이수가압 실험에서 최대 이수압은 토피고에 선형비례하며, 초기 막장압과 최대 이수압의 차인 초과 이수압도 토피고에 선형 비례하였다. 이러한 결과로부터 토피고에 따라 간극수압이 증가하여 이막형성을 위해 침투에 소요된 이수압도 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 초과 이수압은 토피고 0.5D를 제외한 3개 경우에서 15~30 kPa 범위에 형성되어 유사조건에서 Anagnostou & Kovari가 제안한 초과 이수압과 실제 현장적용사례의 범위와 일치하였다.
4. 전방 차수층을 포함하는 지반에서 수행한 이수가압 실험에서 사질토만으로 구성된 경우보다 최대 이수압이 모두 크게 측정되어 차수층 설치로 인한 이수압 증가 효과를 확인하였다.
5. 토피고가 1.5D 이하에서 차수층을 포함하는 사질토에서 최대 이수압은 사질토만으로 이루어진 지반에서의 최대 이수압보다 11~26% 증가하였으며 토피고 2.0D인 경우보다 크게 발생하였다.
6. 초과 이수압의 증가 효과가 가장 큰 차수층의 크기는 1.5D이며 설치높이는 초과 이수압의 증가에 영향이 작은 것으로 파악되었다.
7. 토피고별 초기 막장압과 최대 이수압의 비로 안전율을 산정할 수 있으며 실험결과 저토피 터널에서 차수층으로 인해 막장 자립 안전율이 3.5~4.0 배 증가하였다.
8. 막장면과 차수층이 1.5D이상 이격될 경우 최대 이수압 증가율이 6%로 감소하였다. 따라서 차수층의 위치가 굴착방향으로 1.0D이내이면 초과 이수압 증가효과를 기대할 수 있다.
9. 저토피 이수가압식 쉘드터널에서 투수성이 좋은 지반 내에 차수층이 존재하는 경우에는 이막형성으로 지하수 흐름이 방해되어 막장에 가하는 초과 이수압의 범위를 확대할 수 있으며, 막장 안정성도 증대시킬 수 있다. 실험 결과 가장 효과적인 차수층 범위는 길이 1.0~1.5D, 높이 1.0D이다.

참 고 문 헌

1. 이상덕(1997), 토질실험 원리와 방법, 도서출판 새론, pp. 18-89, 121-133, 268-277.
2. 이상덕(2010), 토질역학, 도서출판 새론, pp. 349-353.
3. Anagnostou, G., Kovári, K. (1994), "The face stability of slurry-shield-driven tunnels", Tunneling and Underground Space Technology, 9(2), 165-174.
4. Anagnostou, G., Kovári, K. (1996), "Face stability conditions earth-pressure-balanced shields", Tunneling and Underground Space Technology, 11(2), pp. 165-173.
5. COB Commissie (1996), "Inventarisatie ontwerp-methoden boortunnels voor weg-en rail-verbindingen", Technical Report L510-01.
6. DUP Science (2001), Tunnel Face Stability & New CPT Applications, Delft University Press, pp. 5-26.
7. Hazen, A.W. (1892), "Physical properties of sands and gravels with reference to their use in filtration", Report Mass, State Board of Health.
8. Kanayasu, S., Kubota, I., Shikibu, N. (1995), "Stability of face during shield tunneling - A survey of Japanese shield tunneling", Underground Construction in Soft Ground, pp. 337-343.